第40卷 第3期
2023年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

气候及土地利用变化对大通河源区水文要素空间分布的影响

赵美亮[1,2]， 曹广超[1,2,3]， 赵青林[1,2]， 曹生奎[1,2,3]

（1. 青海师范大学地理科学学院，青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁 810008；
2. 青海师范大学，青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁 810008；
3. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院，青海 西宁 810008）

摘 要：水资源短缺已成为人类社会主要的资源环境问题，气候和土地利用变化使得水文要素的演变呈现出复杂性与不确定性，探讨变化情景下水文要素空间分布特征对区域经济社会可持续发展具有重要的理论和现实意义。基于1960—2019年大通河源区气象水文数据，通过模型模拟及情景分割方法定量分析了气候和土地利用变化情景下水文要素空间分布特征。结果表明：（1）SWAT模型经过校准与验证后，模型决定系数、纳什系数和百分比偏差（PBIAS）均达到模型要求，其在率定期内分别为0.81%、0.79%和-0.8%，在验证期内分别为0.81%、0.75%和15.8%，表明模型在大通河源区具有较好的适用性。（2）大通河源区各水文要素空间异质性明显，不能用单一的水文要素代表整体的空间分布情况；降水、潜在蒸散发与土壤含水量随海拔的升高而降低，地表径流与产水量随海拔的升高而增加。（3）3种情景下各水文要素的空间分布大体一致，产水量的空间分布受土地利用变化情景的影响比较大。气候变化情景使得实际蒸散发和土壤含水量呈现下降趋势，地表径流和产水量呈现增加趋势，土地利用变化情景下各水文要素的变化与之相反。

关键词：水文要素；空间分布；SWAT模型；大通河

水是地球各种生命赖以生存与发展的基础，对人类有着广泛而深刻的影响[1]。随着全球工业化进程的不断加速及人口的激增，导致水资源开发利用不合理，水资源供需矛盾日益加剧，因而水资源短缺问题已逐渐成为人类经济社会发展所面临的主要资源环境问题，受到国际社会的普遍关注。我国是水资源严重缺乏的国家，人均水资源占有量还不到世界平均水平的四分之一[2-3]，并且时空分布极不均匀[4]。进入21世纪以来，极端干旱气候的频发已使水资源匮乏成为影响我国经济发展、社会安定和生态环境改善的主要制约因素[5-6]。据统计，我国每年因缺水造成的粮食损失达600多亿斤[7]。中国西北干旱区土地面积约占国土面积的24.5%，由于深居亚欧大陆腹地，平均年降水量偏少，是世界上自然环境最严酷的干旱区之一。位于青藏高原东北部的祁连山地跨我国甘肃青海两省，是西北干旱地区最重要的水源地及生态屏障，其生态地位十分重要。

气候和土地利用变化对水文要素的影响呈现出复杂性与不确定性态势，许多国内外学者围绕这两方面展开了一系列的研究[8-9]，一方面，由于自然和人为因素导致的全球气候变暖已成为一个共识。2013年IPCC组织的第五次报告数据显示：过去的100 a，地球表面温度大约上升了0.85 ℃[10]，而国内众多学者的研究结果都表明未来一段时间我国气温将会呈现出继续增温的趋势[11-12]。气候变暖势必会加快水循环速率，对不同时空尺度上降水、蒸发、径流等气象水文要素产生极大影响[13]，并导致极端气候水文事件频发[14]。另一方面，剧烈的人类活动（如水利工程的修建、城市化进程等）改变了

收稿日期：2022-09-01； **修订日期：**2022-12-02
基金项目：青海省科技厅重大专项（2021-SF-A7-1）；青海省创新平台建设专项青海省自然地理与环境过程重点实验室（2020-ZJ-Y06）
作者简介：赵美亮（1995-），男，博士研究生，研究方向为环境地表过程与生态响应. E-mail: zhaomeiliang2014@163.com
通讯作者：曹广超. E-mail: caoguangchao@126.com

流域下垫面条件和水资源在时空尺度上的分配过程，对流域土壤湿度、蒸散发和流域产汇流过程造成了显著影响。而流域地表径流、地下径流、土壤含水量等水文要素直接受降水因素的影响[15]。因此，探讨气候及土地利用变化情景下流域各水文要素的空间分布特征对全面理解水资源演变特征及合理配置提供了新的思路。目前定量评估气候变化和土地利用对水文要素影响的方法主要有传统经验统计分析及水文模型两方面。由于SWAT模型全面的考虑了水文要素变化的自然和人为因素，充分体现出了空间异质性，能较为完整的揭示流域水文过程的内在机理。田晶等[16]基于SWAT模型评估未来气候变化和土地利用变化对汉江流域径流的共同影响，结果表明气候和土地利用变化的叠加使径流呈增加趋势，气候变化较土地利用对径流的影响更加显著。任才等[17]通过对叶尔羌河源区径流变化的影响因素研究认为气候变化是影响径流变化的主要因素。霍军军等[18]通过SWAT模型对拉萨河流域径流进行研究发现气候变化与土地利用对径流影响占比分别约为82.95%和17.05%。

大通河是黄河的二级支流，地处祁连山水源涵养重要生态功能区，是青海省东北部和甘肃省西部重要的水源地，在青海、甘肃两省社会经济发展中具有十分重要的地位。在全球变化背景下，大通河源区陆地水循环过程正发挥着快速变化，水文过程呈现出不稳定性和脆弱性的态势。近年来有许多学者基于常规统计分析方法对大通河流域水资源状况展开了一系列的研究，例如，黄维东等[19]根据实测洪水资料分析了梯级水电开发对流域洪水过程的影响，认为水电站数量的增加使得洪水过程变得极为频繁。董军等[20]认为1994年开始大通河上游径流量缓慢增加，下游则快速下降。王大超等[21]采用回归分析法对大通河干流进行研究发现1956—2015年大通河中上游年径流量以0.0539×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$的速率增加，享堂站则以0.0945×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$的速率减少。但这些研究多围绕单一的径流要素采用常规统计方法从时间尺度开展，对大通河源区各水文要素的空间分布特征尚不清楚，无法全面体现水文要素空间异质性。明晰气候及土地利用变化情景下流域各水文要素的空间分布特征对全面理解水资源演变特征及合理配置提供了新的思路。基于此，本研究以大通河源区为研究区，基于1960—2019年气象水文资料建立SWAT模型，定量分析气候与土地利用变化情景下水文要素空间分布特征，研究结果为区域水资源管理及经济社会可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

大通河流域位于青海省东北部，属黄河二级支流，河流发源于祁连山南麓天峻县木里境内，沿祁连山南麓向东流经青海、甘肃两省的9个县，最后由民和县境内汇入湟水河，全长554 km。本研究所指的大通河源区为青石嘴水文站以上部分，流域内最低海拔为2884 m，最高海拔为5067 m，海拔较高、落差大、地形地貌复杂多样（图1）。气候主要受西风带、高原季风及夏季风的影响，据统计资料显示1960—2019年多年平均降水量为413.34 mm，多年平均气温为-0.59 ℃。土地利用类型以草地为主，占总面积的50%以上。

大通河年均径流约为28.95×10^8 m^3，水资源相对丰富，流域内目前已建成跨流域调水工程3处，分别为1994年的“引大入秦”，据统计年引水量达4.43×10^8 m^3，建成于2003年的“引流济金”工程的年引水量也达到了0.4×10^8 m^3；2016年“引大济湟”工程顺利完工并通水，年引水量3.5×10^8 m^3，此外地方政府还在考虑将流域内的水资源调往黑河、金昌的西大河及青海湖等地区[22]。

1.2 数据来源

本研究所用到的数据主要分为栅格数据和统计数据两大类，栅格数据有DEM、土地利用、土壤类型等，这些也都是模型运行的关键数据；统计数据包括气象数据与水文数据等，气象与水文数据即可以用于模型运行与验证，同时又是历史气象水文规律分析的基础数据。数据详细信息如表1所示。

1.3 研究方法

1.3.1 情景设置　水文要素的变化同时受到气候与土地利用变化的影响，为了定量分析气候与土地利用变化对水文要素的影响，根据1962—2019年气象数据，为保证气象数据时间序列与土地利用数据相对应，以1980年为界将1962—1980年、1981—2019年气象数据与1980年、2020年土地利用数据相互交叉，设计出S0、S1、S2和S3共4种情景（表2）来量化气

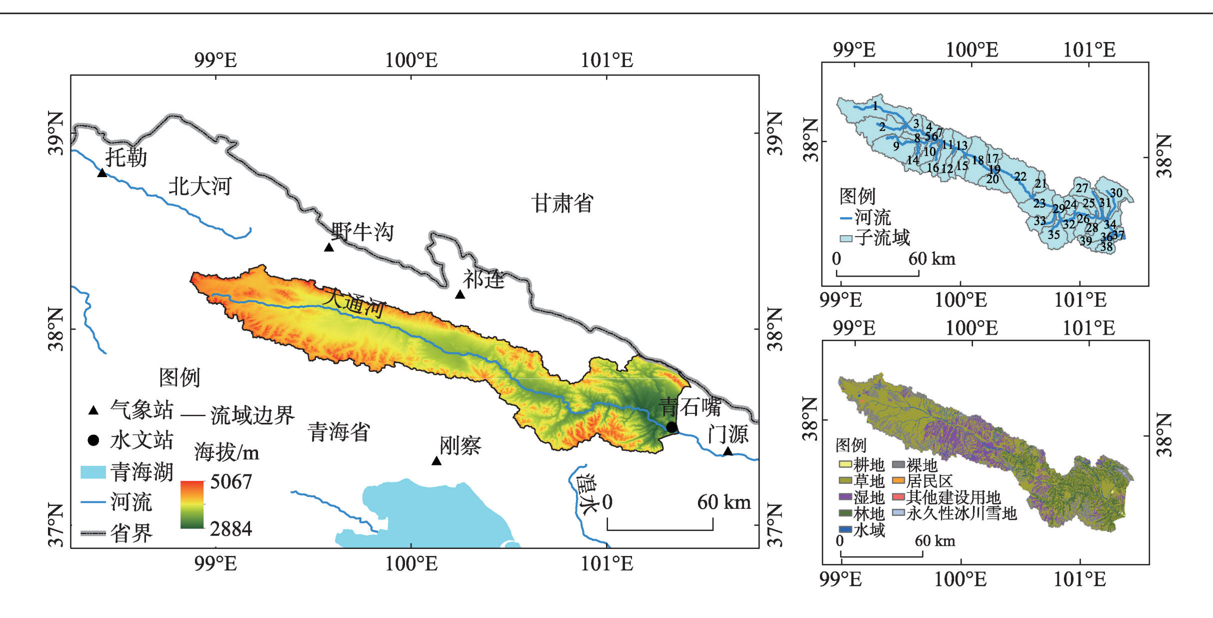


图1　大通河源区区位及子流域划分

Fig. 1　Datong River source region location and subbasin division

表1　SWAT模型所需数据及来源

Tab. 1　Data and sources for the SWAT model

数据名称	数据来源	数据描述
DEM	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)	数字高程模型,30 m×30 m
土地利用	资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)	1980年、2020年土地利用类型图,1000 m×1000 m
土壤数据	联合国粮食及农业组织(FAO)	土地利用空间分布数据,1:1 000 000
气象数据	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)	1960—2019年祁连、门源、野牛沟、刚察、托勒气象站气温、降水、日照、风速、湿度观测数据,逐日
水文数据	青海省水文与水资源局	1960—2016年青石嘴水文站径流观测数据,逐日

表2　气候与土地利用变化情景设置

Tab. 2　The setting of scenario for climate and land use changes

情景	情景类别	气候数据时段	土地利用数据
S0	基础情景	1962—1980年	1980年
S1	气候变化情景	1981—2019年	1980年
S2	土地利用变化情景	1962—1980年	2020年
S3	协同变化情景	1981—2019年	2020年

候与土地利用对水文要素空间分布特征的影响[23-24]。

1.3.2　SWAT模型　SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型具有解决在大尺度复杂的土壤类型、土地利用对水文水资源影响的问题能力[25-27]。模型在ArcGIS 10.2平台上基于流域的地形、土地利用类型及土壤等基础数据可以划分成若干水文响应单元(HRUs),然后在每个水文响应单元内部根据水量平衡原理计算相应的值,最后求得流域总出水口断面的流量。模型建立后,需要经过适用性评价才可以用来模拟大通河源区径流情况[28]。本研究在梳理前人评价体系的基础上[29-31],选择确定系数(R^2)、Nash-Suttcliffe(纳什效率系数,记作NS)和百分比偏差(PBIAS)3个指标作为本模型的评价标准。

2　结果与分析

2.1　SWAT模型的率定与验证

设置1960—1961年为预热期,1962—1999年为率定期,2000—2016年为验证期,以1980年土地利用类型为背景,结合研究区气温与降水数据完成SWAT模型的构建。在DEM集水面积阈值为10000

hm²的情景下共生成了39个子流域。同时，选取26个参数在swat-cup中通过SUFI-2算法对模型进行率定，SWAT模型评价结果如表3所示。

由表3可知，校准期的结果为R^2=0.81，NS=0.79，PBIAS=-0.8%，模拟值较实测值大，分别为50.96 $m^3 \cdot s^{-1}$和50.56 $m^3 \cdot s^{-1}$；验证期的结果为R^2=0.81，NS=0.75，PBIAS=15.8%，模拟值小于实测值，分别为49.97 $m^3 \cdot s^{-1}$和59.33 $m^3 \cdot s^{-1}$。将率定好的参数带回到SWAT模型中重新运行便可得到模拟的径流量，模拟与观测的径流量对比如图2所示，观测值与模拟值具有一致的趋势，整体模拟效果较为理想。综上可知，模型经过率定和验证后在大通河源区具有很好的适用性。

2.2 大通河源区水文要素空间分布特征

根据率定后的SWAT模型得到39个子流域水文要素空间分布特征（图3），年降水量空间分布在467.52~614.41 mm，低值区主要分布在流域西北部和中部部分地区，呈现出从东南向西北减少的趋势。这主要由于流域东部地区较中西部地区更容易受到东部和南部亚洲季风的影响。年实际蒸散发量空间分布特征整体上与降水空间分布类似，说明其与降水的空间分布存在一定的关联关系，但在流域中部地区空间异质性较为明显，主要受其潜在蒸散发空间分布的影响。土壤含水量的空间分布没有明显的规律，其高值区主要分布于流域东部和中部部分地区，其主要原因是流域东部地区降水多，中部部分地区实际蒸散发较少，而地表径流量的空间分布与产流量的空间分布高度趋同。综上所述，流域各水文要素空间异质性明显，不能用单一的水文要素代表整体分布情况。

从不同海拔高程带划分的结果来看（表4），降水、实际蒸散发、土壤含水量均随海拔升高而降低，而地表径流与产流量随海拔升高而增加，潜在蒸散发的分布无明显规律。流域各海拔高程带的干旱指数相差不大，空间分布不明显；但其蒸发系数随海拔升高而降低，说明在降水量充足的情况下，蒸散发能力限制了实际蒸散发的发生。

2.3 气候与土地利用变化情景下水文要素空间变化分析

2.3.1 气候变化情景下径流空间变化分析 气候变化期（1981—2019年）与气候基准期（1962—1980年）相比，气温、降水分别增加了0.92 ℃和38.90 mm。根据情景S0和情景S1模拟结果可知，气候变化导致实际蒸散发和土壤含水量分别下降8.37 mm和3.53 mm，使得地表径流量和产水量分别增加1.53 mm和4.44 mm。由气候变化情景下各水文要素模拟结果与降水量的空间分布特征可知（图4），实际蒸散发与基准期相比，除了19号、21号子流域外，其他子流域均略呈现下降趋势；土壤含水量从原来的9.42~251.54 mm下降到8.72~246.94 mm，仅仅9号和11号子流域略有增加；地表径流大的子流域主要位于流域西北部，尤其是1号、2号、3号、4

表3 大通河源区率定期与验证期模拟结果

Tab. 3 Simulation results of Datong River headwater rate in periodic and validation period

时间段	观测平均值/($m^3 \cdot s^{-1}$)	模拟平均值/($m^3 \cdot s^{-1}$)	NS	R^2	PBIAS/%
率定期	50.56	50.96	0.79	0.81	-0.8
验证期	59.33	49.97	0.75	0.81	15.8

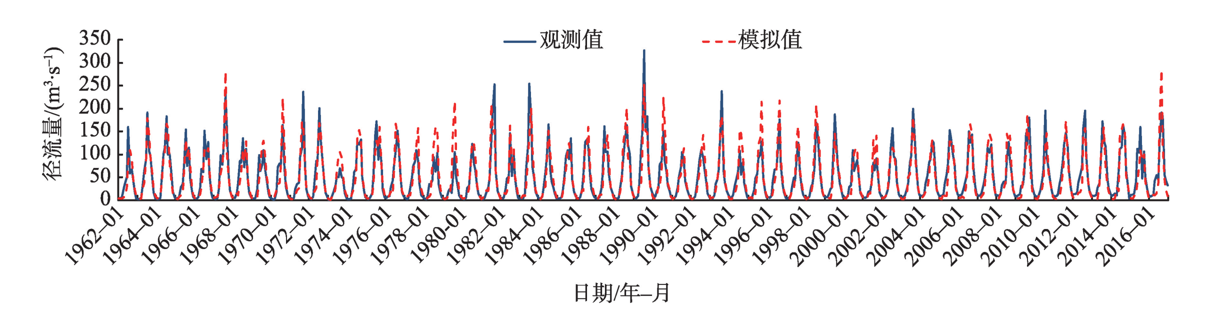


图2 大通河源区模拟径流与实测径流对比

Fig. 2 Comparison of simulated runoff and measured runoff in the source region of Datong River

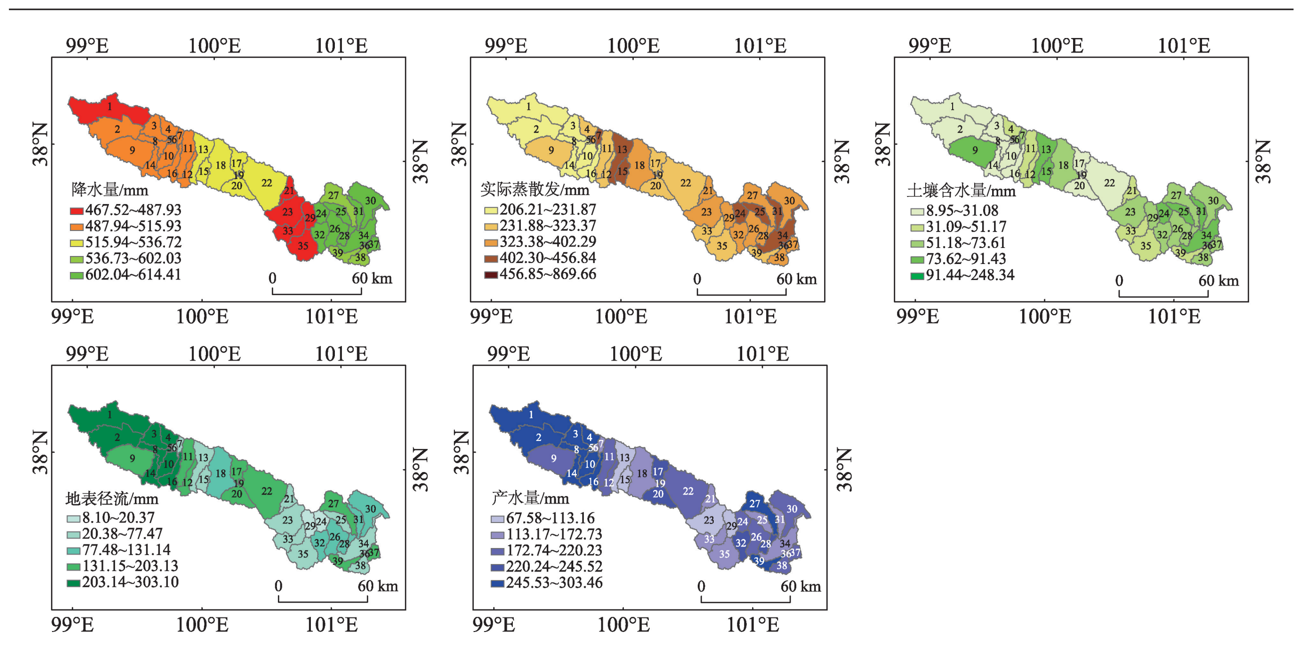


图3　子流域尺度上水文要素空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of hydrological elements at sub-basin scale

表4　大通河源区不同海拔带水文要素分布特征

Tab. 4　Distribution characteristics of hydrologic elements at different elevations in the source region of Datong River

海拔/m	降水/mm	潜在蒸散发/mm	实际蒸散发/mm	土壤含水量/mm	地表径流/mm	产流量/mm	干旱指数	蒸发系数
2884~3427	568.01	737.38	378.89	63.29	84.86	180.41	1.30	0.67
3427~3704	546.87	769.00	368.72	61.73	116.44	188.36	1.41	0.67
3704~3935	535.94	745.05	336.06	52.99	138.11	204.11	1.39	0.63
3935~4177	536.65	744.37	334.63	52.53	136.26	203.01	1.39	0.62
4177~5067	535.81	749.81	332.99	51.92	134.83	203.12	1.40	0.62

号、8号、10号、14号及16号子流域,其多年平均地表径流超过203.23 mm,这主要与其实际蒸散发低和坡度大有关系;产水量空间分布特征与地表径流整体上具有高度的一致性。

总体上,大通河源区多年平均地表径流量最大的子流域与产水量大、实际蒸散发小和土壤含水量小的子流域均分布在流域西北部,多年平均地表径流量和产水量大的子流域分布受流域西北部实际蒸散发小、坡度大和地势陡峭的影响;而土壤含水量的空间分布特征与地表径流和产水量的分布并不一致,说明不能用单一的水文要素代表整体分布情况。

2.3.2　土地利用变化情景下径流空间变化分析　大通河源区主要土地利用类型为草地,占总面积的50%以上;其次是裸地,占总面积的16%以上。耕地、冰川、居民地和其他建设用地只占很小的比例,不足1%。与1980年相比,2020年耕地、居民区、水域和其他建设用地有所增加(表5),其中,其他建设用地增加最明显,增加了42.67 km^2,主要由草地转化而来;永久性冰川雪地减少最明显,减少了49.08 km^2,主要向裸地进行转移。

土地利用变化对水文要素的影响趋势与气候变化情景相反,使得实际蒸散发与土壤含水量分别增加3.42 mm和0.08 mm,地表径流量与产水量分别减少4.41 mm和2.42 mm(图5)。根据基础情景对比可知,地表径流量与产水量发生变化的区域主要有4号、6号、7号及36号子流域;根据子流域主要土地利用类型变化情况可知(表6),4号、6号、7号子流域地表径流及产水量均呈明显的下降趋势,除受蒸散发增加的影响外,主要与裸地转换成草地,而草

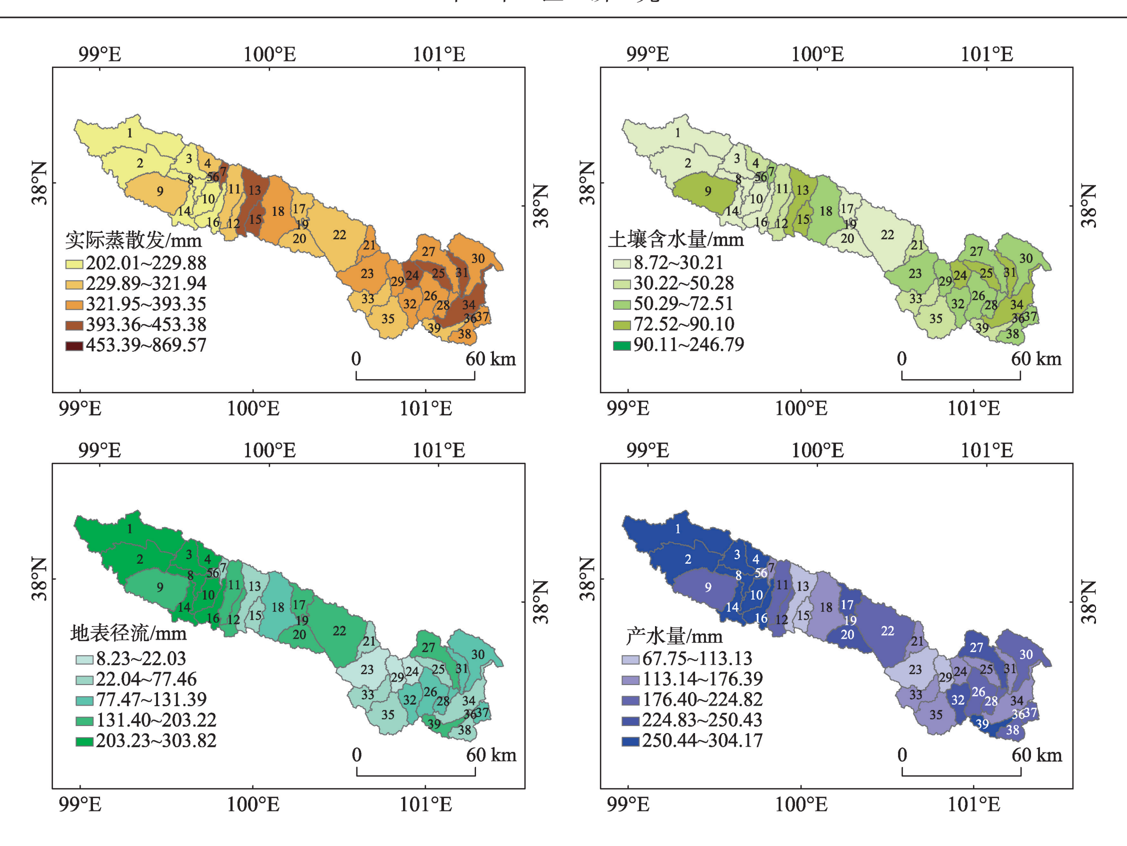


图4 气候变化情景下子流域尺度上水文要素空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of hydrological elements at sub-watershed scale under climate change scenario

表5 1980—2020年土地利用类型变化转移矩阵

Tab. 5 Transfer Matrix of land use type change from 1980 to 2020 /km²

		2020年									
		草地	耕地	居民区	林地	裸地	其他建设用地	湿地	水域	永久性冰川雪地	总计
1980年	草地	3701.71	4.5	1.62	66.3	52.4	38.92	49.52	64.57	0.07	3979.61
	耕地	0.7	8.87	0.07	0.45	–	–	–	0.07	–	10.16
	居民区	0.13	0.06	0.95	0.04	–	–	–	0.03	–	1.21
	林地	65.32	1.33	0.9	991.19	8.83	0.17	0.64	24.82	–	1093.2
	裸地	116.7	–	–	4.33	1228.33	3.29	9.57	1.67	0.37	1364.26
	其他建设用地	2.13	–	–	0.11	–	1.84	–	–	–	4.08
	湿地	60.55		0.01	0.54	15.84	0.92	1027.49	7.11	–	1112.46
	水域	22.8	0.07	–	5.63	1.48	1.61	6.7	254.88	0.03	293.2
	永久性冰川雪地	–	–	–	–	8.3	–	–	–	4.81	13.11
	总计	3970.04	14.83	3.55	1068.59	1315.18	46.75	1093.92	353.15	5.28	7871.29

地地表枯落物对水分的截留作用有关；尽管36号子流域蒸散发增加量较大，但其地表径流和产水量呈增加趋势，由此可见，草地相对于林地更容易产生地表径流。此外，19号子流域虽然蒸散发量下降28.53 mm，但其地表径流和产水量变化不大，这由于该流域主要土地利用类型为水域有关，占该子流域面积的77.96%。

2.3.3 协同变化情景下径流空间变化分析 根据协同变化情景与基础情景对比可知（图6），实际蒸散发、土壤含水量和地表径流量分别下降了4.87 mm、

表6　主要子流域土地利用类型变化情况及水文要素变化

Tab. 6　Changes of land use types and hydrological factors in main sub-basins

子流域编码	实际蒸散发/mm	土壤含水量/mm	地表径流/mm	产水量/mm	草地转林地/km²	林地转草地/km²	裸地转草地/km²
4	26.93	11.89	−41.43	−27.81	0.00	0.00	14.61
6	24.04	11.30	−45.95	−28.59	0.00	0.00	2.53
7	38.39	19.11	−76.58	−48.23	0.00	0.00	6.37
36	68.87	5.31	7.78	9.62	0.17	0.24	0.00

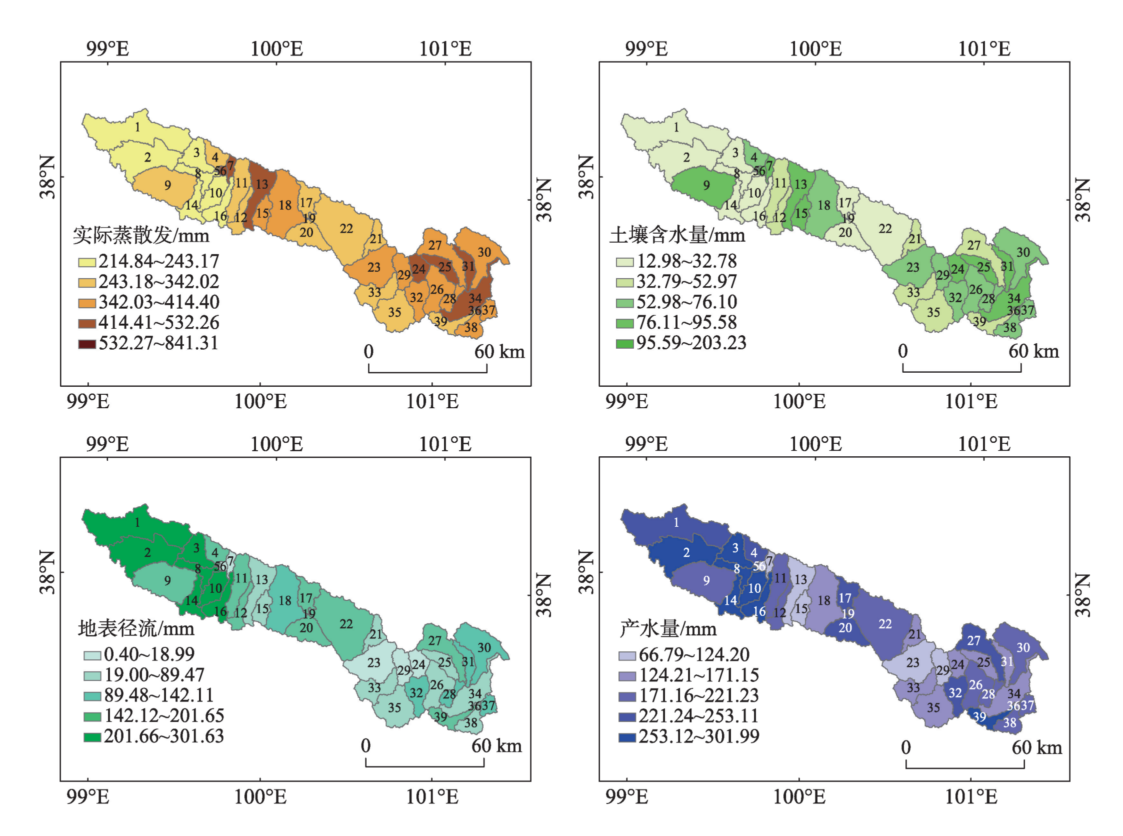


图5　土地利用变化情景下子流域尺度上水文要素空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of hydrological elements at sub-watershed scale under land use change scenario

3.46 mm和2.92 mm,产水量增加1.86 mm。实际蒸散发和土壤含水量最大的区域均位于19号子流域,尤其是实际蒸散发远超降水量,达到了840.32 mm,土壤含水量也达到了198.48 mm,主要是因为该子流域土地利用类型为水域,占比77.96%。该情景下地表径流量、产水量与气候变化情景不同的是4号子流域呈现减少的趋势,分别为196.97 mm和239.56 mm,主要受土地利用变化的影响,该子流域在1980—2020年裸地转为草地和水域转为草地的面积比较大,分别为14.61 km²和1.64 km²,而草地面积的增加使得该区域涵养水源的能力增强。此外协同变化情景下其他水文要素的空间分布变化不大,主要是因为研究区土地利用变化不大导致其对水文要素的影响比较小。

3　讨　论

水文要素变化的影响因素主要体现在气候变化和土地利用变化两方面。气候变化对水文要素的影响主要是由气温和降水共同引起,降水是河川径流补给的重要组成部分,而气温通常认为是通过引起冰雪消融对高寒地区的河流起补给作用;气温对径流的调控作用还表现在通过影响蒸散发作用进而减少径流量[33]。由于研究区位于河流源区,地势较高,气温在气候变化情景下仅上升至−0.27 ℃,对实际蒸散发的变化影响较小,因此气温引起径流减少的因素可以忽略,但对于其季节性的差异仍有

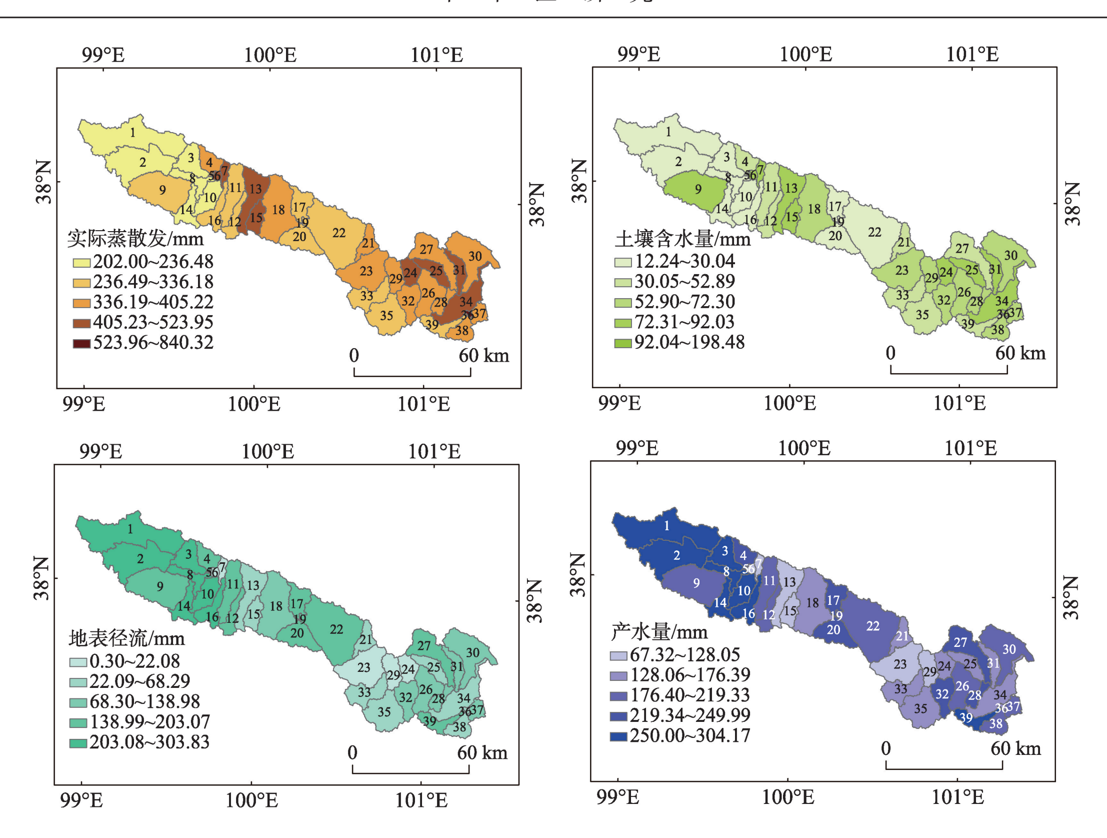


图6 协同变化情景下子流域尺度上水文要素空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of hydrological factors at sub-catchment scale under co-change scenario

待后续研究。土地利用是仅次于气候变化影响水文要素的另一因素,其主要表现在不同土地覆被对水文过程各要素的影响。而土地利用变化不仅受人类活动的影响,还受气候变化所带来覆被改变的控制,其影响机理和强度也不尽相同。

在未来研究中需要结合不同时间尺度下气候变化详细分析不同类型土地利用变化对流域水文要素的影响,以便更好地为大通河源区水资源合理利用提供支撑。

4 结 论

本研究基于1960—2019年大通河源区气象水文数据,通过模型模拟及情景分割方法定量分析了气候和土地利用变化情景下水文要素空间分布特征。得到以下结论:

(1) SWAT模型在大通河源区的月径流模拟效果较好,其校准期的结果为R^2=0.81,NS=0.79,PBIAS=-0.8%;验证期的结果为R^2=0.81,NS=0.75,PBIAS=15.8%,模型适用于流域气候和土地利用变化对各水文要素的影响研究。

(2) 大通河源区多年平均地表径流量与产水量随海拔的升高而增加,其最大的子流域主要分布在流域的西北部,流域各水文要素空间异质性明显,不能用单一的水文要素代表整体分布情况。

(3) 大通河源区土地利用类型以草地为主,气候变化和人类活动共同导致1980—2020年土地利用类型变化,主要表现在建设用地和水域的增加及裸地和冰川的减少,但由于研究区草地和林地覆盖面积大,其水源涵养能力较强。大通河源区水文要素的变化主要受气候因素的影响,气候与土地利用变化情景对各水文要素的影响呈现相反的趋势。

参考文献(References):

[1] Siqueira P P, Oliveira P T S, Bressiani D, et al. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37: 100931.

[2] 董晓光. 浅谈水资源利用与保护[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(5): 35-36. [Dong Xiaoguang. On the utilization and protection of water resources[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(5): 35-36.]

[3] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. [Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. Situation and problem analysis of water resources security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-120.]

[4] 胡宏韬, 林学钰, 蔡青勤. 中国的水环境状况及对策[J]. 干旱环境监测, 2001, 15(1): 41-44. [Hu Hongtao, Lin Xueyu, Cai Qingqin. State of water environment and countermeasure in China[J]. Arid Environmental Monitoring, 2001, 15(1): 41-44.]

[5] 王正, 黄粤, 刘铁, 等. 近60 a巴尔喀什湖水量平衡变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 400-409. [Wang Zheng, Huang Yue, Liu Tie, et al. Analyzing the water balance of Lake Balkhash and its influencing factors[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 400-409.]

[6] 盖美, 翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4746-4756. [Gai Mei, Zhai Yuqian, Measurement and coordinated development of water resources, energy, food and support security in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4746-4756.]

[7] 李文娟, 覃志豪, 林绿. 农业旱灾对国家粮食安全影响程度的定量分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 111-118. [Li Wenjuan, Qin Zhihao, Lin Lv. Quantitative analysis of agro-drought impact on food security in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 111-118.]

[8] Guo W, Hu J, Wang H. Analysis of runoff variation characteristics and influencing factors in the Wujiang River Basin in the past 30 Years[J]. Environmental Research and Public Health, 2022, 19(1): 19010372.

[9] Xue D X, Zhou J J, Zhao X, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical arid watershed, NW China[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107013.

[10] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[11] 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国近百年温度曲线的对比分析[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71-78. [Tang Guoli, Ding Yihui, Wang Shaowu, et al. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(2): 71-78.]

[12] 张莉, 丁一汇, 吴统文, 等. CMIP5模式对21世纪全球和中国年平均地表气温变化和2 ℃升温阈值的预估[J]. 气象学报, 2013, 71(6): 1047-1060. [Zhang Li, Ding Yihui, Wu Tongwen, et al. The 21st century annual mean surface air temperature change and the 2 ℃ warming threshold over the globe and China as projected by the CMIP5 models[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(6): 1047-1060.]

[13] Immerzeel W W, van Beek L P, Bierkens M F. Climate change will affect the Asian water towers[J]. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.

[14] Wu J K, Li H Y, Zhou J X, et al. Variation of runoff and runoff components of the upper Shule River in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau under Climate Change[J]. Water 2021, 13(23): 3357.

[15] Wu Y Y, Fang H W, Huang L, et al. Changing runoff due to temperature and precipitation variations in the dammed Jinsha River [J]. Journal of Hydrology, 2019, 582: 124500.

[16] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2307-2318. [Tian Jing, Guo Shenglian, Liu Dedi, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11): 2307-2318.]

[17] 任才, 龙爱华, 於嘉闻, 等. 气候与下垫面变化对叶尔羌河源流径流的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1373-1383. [Ren Cai, Long Aihua, Yu Jiawen, et al. Effects of climate and underlying surface changes on runoff of Yarkant River Source[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1373-1383.]

[18] 霍军军, 伊明启, 王静, 等. 拉萨河流域径流对土地利用和气候变化的响应分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 33-39. [Huo Junjun, Yi Mingqi, Wang Jing, et al. Response of runoff in Lhasa River Basin to land use and climate change[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 33-39.]

[19] 黄维东, 牛最荣, 刘彦娥, 等. 梯级水电开发对大通河流域洪水过程的影响分析[J]. 水文, 2016, 36(4): 58-65. [Huang Weidong, Niu Zuirong, Liu Yan'e, et al. Effect of cascade hydroelectric development on flood process in Datonghe River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(4): 58-65.]

[20] 董军, 胡进宝, 魏国孝. 大通河流域径流变化及特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 75-80, 87. [Dong Jun, Hu Jinbao, Wei Guoxiao. Analysis of runoff variation and characteristics in Datong River basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6): 75-80, 87.]

[21] 王大超, 杜丽芳, 路贺, 等. 大通河流域近60年径流变化特征和趋势分析[J]. 水利水电快报, 2019, 40(4): 17-21. [Wang Dachao, Du Lifang, Lu He, et al. Variation characteristics and trend analysis of runoff in Datong River basin in recent 60 years[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40(4): 17-21.]

[22] 刘赛艳, 黄强, 解阳阳, 等. 大通河流域上游径流变化特征与突变分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 219-226. [Liu Saiyan, Huang Qiang, Xie Yangyang, et al. Abrupt change and variation characteristics of runoff in the upper reaches of Datong River basin[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 44(3): 219-226.]

[23] Wu Jun, Deng Guoning, Zhou Dongmei, et al. Effects of climate change and land-use changes on spatiotemporal distributions of blue water and green water in Ningxia, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(7): 674-687.

[24] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC及气候变化对澜沧江流域径流的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4687-4696. [Dou Xiaodong, Huang Wei, Yi Qi, et al. Impacts of LUCC and climate change on runoff in Lancang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4687-4696.]

[25] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic

modeling and assessment(Part 1): Model development[J]. Journal of American Water Resource Association, 1998, 34(1): 73-89.

[26] 宋玉鑫, 左其亭, 马军霞. 基于SWAT模型的开都河流域水文干旱变化特征及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 610-617. [Song Yuxin, Zuo Qiting, Ma Junxia. Variation and dynamic drivers of drought in Kaidu River Basin based on the SWAT model [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 610-617.]

[27] 郭伟, 陈兴伟, 林炳青. SWAT模型参数对土地利用变化的响应及其对不同时间尺度径流模拟的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6373-6383. [Guo Wei, Chen Xingwei, Lin Bingqing. Response of SWAT model parameters to land use change and its effects on the simulation of runoff with different time scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6373-6383.]

[28] Wang Z Y, Cao J S. Spatial-temporal pattern study on water conservation function using the SWAT model[J]. Water Supply, 2021, 21(7): 3629-3642.

[29] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 等. 基于SWAT模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5149-5157. [Zubaidai Muyibul, Shi Qingdong, Pulati Muhtar, et al. Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: A SWAT model based analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5149-5157.]

[30] 王钰双, 陈芸芝, 卢文芳, 等. 闽江流域不同土地利用情景下的径流响应研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 30-36. [Wang Yushuang, Chen Yunzhi, Lu Wenfang, et al. The hydrological response to different land use scenarios in the Minjiang River basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 30-36.]

[31] 邹凯波, 张玉虎, 刘晓伟, 等. 气候变化下乌伦古河流域农业面源污染负荷响应[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 625-637. [Zou Kaibo, Zhang Yuhu, Liu Xiaowei, et al. Response of agricultural nonpoint source pollution load in the Ulungur River basin under climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 625-637.]

[32] 田义超, 王世杰, 白晓永. 桐梓河流域径流对气候和人类活动的响应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 76-82. [Tian Yichao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong. Response of runoff to climate and human activities in Tongzi Tiver Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 76-82.]

[33] Yang L S, Feng Q, Yin Z L, et al. Identifying separate impacts of climate and land use/cover change on hydrological processes in upper stream of Heihe River, Northwest China[J]. Hydrological Process, 2017, 31(5): 1100-1112.

Effects of climate and land use change on the spatial distribution of hydrological factors in the source region of Datong River

ZHAO Meiliang[1,2], CAO Guangchao[1,2,3], ZHAO Qinglin[1,2], CAO Shengkui[1,2,3]

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability People's Government of Qinghai Province & Beijing Normals University, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: Water shortage has become a major resource and environmental challenge worldwide. Climate and land use change have made the evolution of current hydrological factors complex and uncertain. Exploring the spatial distribution characteristics of hydrological factors under dynamic scenarios is of vital theoretical and practical significance for the sustainable development of regional economy and society. The meteorological and hydrological data of the Datong River source region from 1960 to 2019 were used in this study to quantitatively analyze the spatial distribution characteristics of hydrological elements under climate and land use change scenarios based on model simulation and scenario segmentation. The results showed that: (1) After calibration and verification of the SWAT model, the coefficient of determination, Nash coefficient, and percentage bias (PBIAS) all met the model requirements of 0.81%, 0.79%, and −0.8% in the rate period, and 0.81%, 0.75%, and 15.8% in the validation period, respectively, which indicated that the model had good applicability in the headwaters of the Chase River. (2) Obvious spatial heterogeneity of hydrological elements was detected in the headwater area of Datong River, and a single hydrological element could not represent the overall spatial distribution. Precipitation, potential evapotranspiration, and soil water content decreased with the increase in altitude, while surface runoff and water yield increased with the increase in altitude. (3) The spatial distribution of hydrological factors under the three scenarios were generally consistent, while the spatial distribution of water yield was greatly affected by the land use change. Under the climate change scenario, the actual evapotranspiration and soil water content showed a downward trend, while the surface runoff and water yield showed an upward trend. Under the land use change scenario, the changes of hydrological elements were contrary to these observations.

Keywords: hydrological elements; spatial distribution; SWAT model; Datong River